<응용논문>

DOI http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2014.38.10.1101

ISSN 1226-4873(Print) 2288-5226(Online)

상온-저온 RF 커플러 유한요소해석§

김한솔*·이학용*·박 찬*·이재열*·임동열*·유정훈**·현명욱**
* 연세대학교 기계공학부, ** 기초과학연구원

Finite Element Analysis of RF Coupler in Normal-Low Temperature

Hansol Kim*, Hak Yong Lee*, Chan Park*, Jaeyeol Lee*, Dong Yeal Lim*, Jeonghoon Yoo*† and Myung Wook Hyun**

* School of Mechanical Engineering, Yonsei Univ.

** Rare Isotope Science Project, Institute of Basic Science

(Received April 23, 2014; Revised June 25, 2014; Accepted June 25, 2014)

Key Words: RF Coupler(RF 커플러), Electromagnetic Wave(전자기파), Temperature Gradient(온도 구배), Stress Deformation(응력변형), Coupling Analysis(연성해석)

초록: 중이온 입자가속기는 중이온을 radio frequency (RF) 주파수로 가속하는 장치이다. RF 공동부에 인가된 전기장은 입력된 RF 파에 의해 전자기파의 위상에 맞춰 중이온을 연속적으로 가속한다. 이를 위해서는 안정적으로 RF 파를 공동부 내부에 전달할 수 있는 커플러의 형상설계가 요구된다. 중이온 가속기에서의 RF 커플러는 입력부와 RF 주파수의 파를 방출하는 커플러 양 끝단 간의 온도차이가 매우 크다.이 온도차를 극복하기 위해선 초저온(약 0K)부터 상온 간(약 300K)의 열 변형을 고려한 해석 및 설계기술이 필요하다. 본 연구는 RF 커플러의 구조에 따른 출력 전기장의 세기와 온도 분포, 열 손실과 열 변형을 고려한 내구도 분석을 통해 성능 향상을 위한 방안들을 도출하는 것을 목적으로 하였다.

Abstract: A heavy ion accelerator is a device that accelerates heavy ions in the radio frequency (RF) range. The electric field that flows into the RF cavity continuously accelerates heavy ions in accordance with the phase of the input electromagnetic wave. For the purpose, it is necessary to design a coupler shape that can stably transfer the RF wave into the cavity. The RF coupler in a heavy ion accelerator has a large temperature difference between the input port and output port, which radiates the RF waves. It is necessary to consider the heat deflection on the RF coupler that occurs as a result of the rapid temperature gradient from an ultra-low temperature about 0 K to a room temperature about 300 K. The purpose of this study was to improve the system performance through an analysis of the intensity of the output electric field and temperature distribution considering various shapes of the RF coupler, along with an analysis of the durability considering the heat deflection and heat loss.

1. 서 론

중이온 입자가속기는 가속기 내의 중이온을 radio frequmcy(RF) 주파수로 가속하는 장치이다. 중이온 가속기는 핵물리, 천체물리, 재료공학 등 첨단 기초과학연구를 수행할 수 있는 핵심연구시설이다. 현재 세계적으로 수요에 비해 구축된 시

설이 매우 부족한 상황으로 일부 연구소에 의해서 집중적으로 연구수행이 이루어지고 있다.(1~3) 국내에서도 그 중요성을 인식해 지난 2010년 3월부터 기초과학연구원의 주도로 설계 및 시스템 구축에 착수한 상태이다.

중이온 가속기의 구성성분 중 하나인 RF 커플러(coupler)는 가속기에서 안정적인 파(wave)를 공동부(cavity)에 전달하여 계속적으로 입자를 가속시켜 주는 장치로서, 가속기의 성능과도 직결되기때문에 안정적이고 내구성 있는 커플러를 설계하는 것은 매우 중요하다. RF 커플러의 성능연구는실제 실험을 통한 검증이 주로 사용되나 현재 국

[§] 이 논문은 2014 년도 대한기계학회 CAE 및 응용역학부문 춘계학술대회(2014.4.30.-5.3., 서귀포 KAL 호텔) 발표논문임

[†] Corresponding Author, yoojh@yonsei.ac.kr © 2014 The Korean Society of Mechanical Engineers

내 환경상 RF 커플러의 직접 제작과 실험이 힘들기 때문에 시뮬레이션을 이용해 RF 커플러의 성능연구를 수행하고자 하였다.⁽⁴⁾

본 연구에서는 기존의 RF 커플러 중 한 개를 기준 모델(prototype)으로 설정하고 성능향상과 구조 안전성을 위해 기준 모델의 구조를 변형하는 설계를 진행하였다. 전자기-열-구조의 연성해석을 통해 RF 커플러의 성능을 예측하고 이를 바탕으로 요구되는 성능 구현을 위한 RF 커플러 형상 설계방안을 도출하였다.

2. 연구수행 내용

2.1 연구수행 내용 및 방법

수행된 연구의 주 내용은 RF 커플러의 형상 및 치수 변화에 따른 RF 파의 전달, 온도 분포에 의한 열 손실, 열 변형에 의한 커플러의 내구성 등을 평가하는 것이다. 본 연구에서는 Fermi Lab 의모델[325MHz, 10kw Model(실린더 내경: 76mm, 안테나 외부 직경: 12.5mm)]을 기반으로 하여 설정한기준 모델[81.25MHz, 3kw Model(실린더 내경: 40mm, 안테나 외부 직경: 12.5mm)]을 바탕으로 하여 해석을 진행하였다. (5,6) 또한 기준모델의 구조를 변형한 모델의 전자기, 열, 응력의 연성해석을 진행하고 그 결과를 비교하였다. 해석에는 유한요소해석(finite element analysis, FEA) 상용 프로그램인 COMSOL Multiphysics 가 사용되었다.(4)

2.2 재료물성 및 모델설명

RF 커플러는 크게 구리 재질의 내부 안테나와 스테인리스강(stainless steel)재질의 외부 케이스, 그리고 Al_2O_3 재질의 세라믹 윈도우로 이루어져 있다. (5.6) 본 연구의 해석에서 사용된 재료의 물성치들은 외부 조건과 연성해석에 따른 값의 변화를 고려하였다. Fig. 1은 해석에 사용된 RF 커플러 기준 모델 구조의 개략도이다. 안테나 포트(port)에 입력되는 파워는 모든 경우에 대해서 82.5MHz, 3kW로 동일하다. 2K의 온도를 갖는 공동부와 상온(room temperature)에서 진공용기(vacuum vessel)의

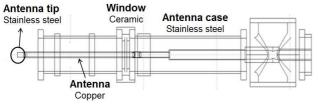


Fig. 1 The schematic diagram of the prototype of an RF coupler

역할을 하는 스테인리스강 재질의 케이스를 만들어서 실제 장치가 작동할 때의 환경을 고려하였다.

본 연구에서는 내부 케이스(case)의 두께를 1t에서 1.5t로 증가시키면서 응력분포의 변화를 확인하였고, 추가적으로 안테나 내부 각진 부분에 필렛 (fillet)형상을 추가한 구조와 벨로우즈(bellows)를 추가한 구조, 냉각 모듈의 위치변경에 대해서도해석을 진행하여 그에 따른 효과를 확인하였다.

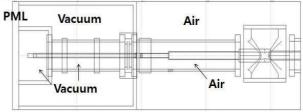
Fig. 2는 전자기장 해석을 위한 모델의 경계조건을 나타내고 있다. 입력 빔(beam)은 오른쪽 포트에서 주입되며 안테나를 따라 흐르는 전자기장을 측정한다.

Fig. 3은 열해석을 위한 경계 조건을 나타낸다. (5~7) RF 파에 의해 발생하는 저항열(resistive heating)은 변형에 큰 영향을 주므로 열해석에서 고려되어야

Table 1 The classification of analysis models (unit: mm)

Model	Outer	Outer	Case
	diameter of	diameter of	thickness
	cylinder	antenna	
Prototype model	40	12.5	1.0
Model with case thickness increase	40	12.5	1.5
Model with bellows	40	12.5	1.5
Model with bellows and fillet	40	12.5	1.5
Model with different cooling module location	40	12.5	1.5

Cryomodule: Stainless steel box



Another metal material: Perfect Electric Conductor

Fig. 2 The boundary condition of the prototype RF coupler for EM analysis

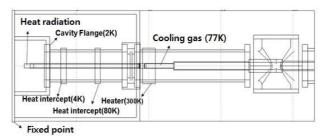


Fig. 3 The boundary condition of the prototype RF coupler for thermal analysis

한다. Table 1은 해석의 대상이 되는 구조물들의 형 상과 치수를 표로 정리한 내용을 보여주고 있다.

2.3 해석이론

2.3.1 전자기 해석이론

RF 커플러 주변의 전기장(electric field) 해석을 위해서 다음의 식 (1)과 같은 Helmholtz equation을 지배 방정식(governing equation)으로 하여 해석을 수행하였으며 모든 금속 물질은 완전도체(perfect electric conductors, PEC)로 가정하고 해석하였다.⁽⁸⁾

$$\nabla \times (\mu^{-1} \nabla \times E) - k_0^2 \varepsilon_r E = 0$$
where $k_0 = \omega \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}$ (1)

여기서 k_0 는 공간에서의 wave number를, ε_0 와 μ_0 는 공간에서의 전기 유전율(electric permittivity), 자기 투과율(magnetic permeability)를 나타낸다. 더불어 반사 현상에 의한 파의 상호 간섭 방지를 위하여 경계면 주위에 perfect matched layer (PML)와 산란 경계조건(scattering boundary condition)을 설정하여 해석을 수행하였다.

2.3.1 열 해석이론

RF 커플러 내부에 위치하는 heat interceptor와 heater의 경계조건 및 RF 파에 의해 생성되는 저항열을 고려하여 RF 커플러의 온도 분포를 구하였다. (5~7) 정상상태(steady state) 해석에서의 열전도 현상은 다음의 식 (2)와 같이 표현된다.

$$\nabla \cdot (-k\nabla T) = Q \tag{2}$$

여기서 k는 재질의 열전도도(thermal conductivity), Q는 heat flux를 의미한다. 또한, 안테나 끝단에서 부터 공동부 내부로의 복사열은 재질의 surface emissivity를 0.5로 가정하고 계산하였다. 온도 분포가 구해지게 되면 heat intercept의 열손실이 계산될 수 있다.

2.3.3 변형 해석이론

열 해석에 따른 온도 구배에 의하여 재료는 열 변형을 하게 되고 이에 따른 응력이 발생하게 된다. 열 변형에서의 기준 온도는 300K로 설정하였다. 구조 내의 von-Mises 응력을 관찰하여 응력 분포를 구하고 이에 따른 구조물의 내구도를 평가하였다.

3. 해석결과

3.1 기준 모델의 해석

Fig. 4는 기준 모델(prototype)의 유한요소 해석결

과를 나타낸 그림이다. 안테나 끝단에서의 전기장 (출력 전기장) 세기는 31397V/m가 계산되며 전기장의 최대치는 1.153x10⁵V/m로 해석되었다. 저항열을 고려한 RF 커플러의 온도 분포는 Fig. 4(b)와같으며 최대 온도는 상은 영역에서 300.28K로 나타났다. 안테나 끝단에서의 복사 열손실은 0.71W, 4K intercept에서는 0.0086W, 80K intercept에서의열 손실은 0.03W로 나타났다. Fig. 4(c)에서 타원으로 표시한 부분은 장치 내에서 최대 응력이 발생하는 지점으로 대략 850MPa정도로 나타났다. 이와같은 응력을 견디기 위해서 케이스의 재료는특수처리된 스테인리스장(17-7 PH, yield strength: 1517 MPa)이요구된다. 세라믹 윈도우 부분의 최대 응력은 170MPa으로 해석되었다.

3.2 안테나 케이스 두께 증가 모델의 해석

Fig. 5는 최대응력값을 감소시키기 위해 두께를 증가시킨 세라믹 윈도우 우측의 안테나 케이스 (case)를 나타낸 그림이다. 기준 모델에서 케이스

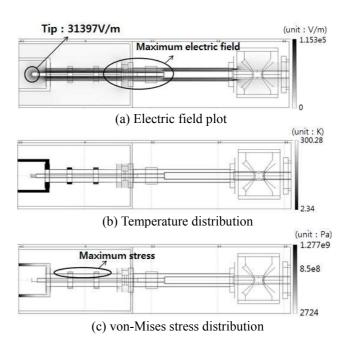


Fig. 4 Results of FEA analysis for the prototype model

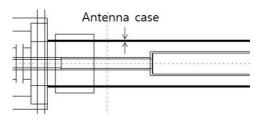


Fig. 5 The schematic diagram of the model with antenna case thickness increase

의 두께를 1t에서 1.5t로 증가시킨 경우에는 출력 전기장의 세기는 30784V/m로 거의 변화가 없었으 며 이는 내부공간의 변화가 없기 때문으로 판단된 다. 온도 분포도 거의 동일하며 안테나 끝단에서 의 복사 열손실은 0.62W, 4K interceptor에서는 0.27W, 80K interceptor에서의 열손실은 0.96W로 예 측되었다. 최대응력은 기준 모델과 동일한 부분 (Fig. 4(c) 참조)에서 나타나는데 해석에 의한 예측 값이 700MPa정도로 기준 모델 대비 약 18%의 감소 효과를 얻을 수 있었다. 세라믹 윈도우 부분의 최대 응력은 100MPa이다.

3.3 벨로우즈 추가 모델의 해석

Fig. 6은 응력 변형을 감소시키기 위해 벨로우즈 구조를 추가한 RF 커플러의 개략도이다.⁽⁹⁾ 벨로우 즈를 추가하여 확인한 전기장의 분포는 Fig. 7(a)에 나타낸 바와 같이 벨로우즈 부근에서 전계가 몰리 는 현상 외에는 이전 모델의 결과와 차이가 거의 없는 것을 확인할 수 있으며 전기장의 최대치는 1.685x10⁵V/m로 해석되었다. RF 커플러의 온도 분 포는 Fig. 7(b)와 같으며 최대 온도는 상온 영역에 서 300.65K 정도로 고르게 분포되었다. 안테나 끝 단에서 복사 열손실은 0.63W, 4K interceptor에서의 열손실은 0.28W, 80K interceptor에서의 열손실은 0.9W로 각각 나타났다. Fig. 7(c)에서와 같이 응력 은 기준 모델의 경우와 동일한 위치에서 700MPa 의 최대값을 나타내었다. 위의 결과로 볼 때 현 위치에의 벨로우즈 구조의 추가만으로는 응력감소 효과를 주지 못하는 것으로 판단되며, 효과적인 응력감소를 위해서는 적절한 위치로의 벨로우즈 의 위치 변경이 필요한 것으로 판단된다. 세라믹 윈도우 부분의 최대 응력은 100MPa으로 예측되었 다.

3.4 안테나 내부 필렛 추가 모델의 해석

앞의 경우를 살펴 보면 안테나 내부의 각진 부분에서 전계 집중현상이 나타남을 확인할 수 있다. 이를 막기 위해 Fig. 8과 같이 안테나의 각진 부분에 필렛 형상을 부여하였고 세라믹 윈도우와 케이스 사이의 단을 없애기 위해 윈도우 홈 부분의 직경을 40mm로 변경하였다.(10) 필렛을 준 모델의 경우 안테나 끝단(tip)에서의 전기장 값이 40655V/m로 필렛을 주기 전에 비해 약 28% 상승함을 보여주었고 이를 통해 필렛을 준 모델에서는 전자파가막힘이 없이 잘 전파됨을 확인할 수 있다. 안테나끝단에서 복사 열 손실은 0.58W, 4K interceptor에서의 열 손실은 0.17W, 80K interceptor에서의 열 손실

은 0.65W로 나타났다. 최대응력은 다른 경우와 같은 곳에서 부분에서 700MPa, 세라믹 윈도우 부분의 최대 응력은 100MPa로 측정되었다. 해석결과를 통하여 필렛의 추가가 응력 감소에는 큰 영향을 주지 못하는 것을 알 수 있다.

3.5 극저온유지모듈의 위치 변경 모델의 해석 벨로우즈의 위치에 따른 구조물의 응력변화를

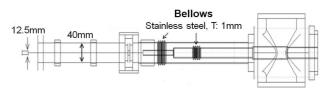


Fig. 6 The schematic diagram of RF coupler adding a bellows part

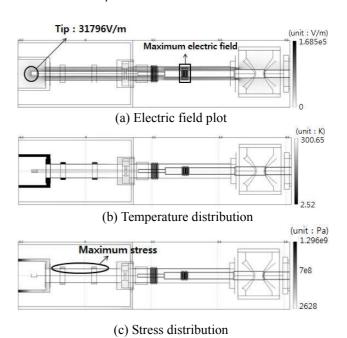


Fig. 7 Results of FEA analysis for the RF coupler model adding a bellows part

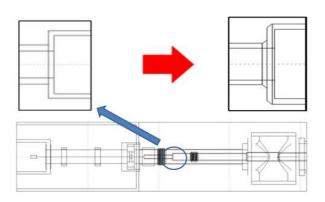


Fig. 8 RF coupler model adding a fillet shape

확인하기 위해 Fig. 9와 같이 냉각모듈의 크기를 20cm 우측으로 확장하여 벨로우즈를 극저온유지모 듈(cryomodule) 내부에 위치시켰다. Fig. 10(a)에 나타 낸 전기장의 최대치는 1.581x10⁵V/m로 위치 변경 전과 비교했을 때 조금 감소하였으나 안테나 끝의 전기장 세기는 오히려 증가함을 확인할 수 있다. 온도 분포는 Fig. 10(b)에 나타내었으며 최대 온도는 상은 영역에서300.61K로 예측되었다. 안테나 끝단, 4K interceptor 및 80K interceptor에서의 복사 열손실은 각각 0.40W, 0.35W, 0.53W로 나타났다. Fig. 10(c)는 응력분포를 나타내고 있으며 최대 응력은 표시된 부분에서 350MPa 예측되어 위치변경 전에 비해서 절반 정도로 감소함을 확인할 수 있다. 세라믹 윈도우 부분의 최대 응력은 150MPa이다.

3.5.1 극저온유지모듈의 위치 변경 후 벨로우즈 유무에 따른 응력해석 결과 비교

극저온유지모듈의 위치를 변경시킨 모델에서 벨

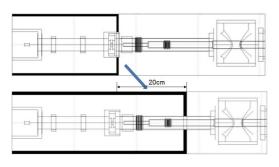


Fig. 9 The schematic diagram of the RF coupler changing the position of the cryomodule

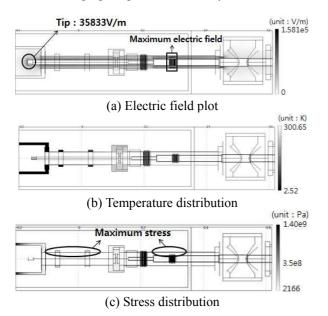


Fig. 10 Results of FEA analysis for the RF coupler model changing the cryomodule location

로우즈의 유무에 따른 응력해석을 수행하여 그에 따른 영향을 확인하였다. Fig. 11(a)는 벨로우즈가 있는 경우, Fig. 11(b)는 벨로우즈가 없는 경우의 응력해석 결과이다. 벨로우즈를 설치했을 경우의 응력은 표시한 부분에서 350MPa, 설치하지 않은 경우에는 700MPa로 벨로우즈 위치와 극저온유지모듈 위치의 조합을 통해 응력감소 효과를 얻을 수있음을 확인할 수 있다.

3.5.2 극저온유지모듈 내에서 벨로우즈의 위치에 따른 응력해석 결과

극저온유지모듈 내에서 벨로우즈의 위치에 따른 응력해석을 진행해 응력감소 효과를 높일 수 있는 벨로우즈의 위치선정을 수행하였다. 벨로우즈를 위치시킨 부분은 온도 구배가 큰 4K interceptor와 80K interceptor사이, 80K interceptor와 세라믹 윈도 우 사이이다. Fig 12(a)에 나타낸 바와 같이 4K interceptor와 80K interceptor사이에 벨로우즈를 위 치시킨 경우, 그림에 표시한 부분에서 응력이 300MPa로 계산되어 안테나 케이스 전체에서 50MPa의 응력감소 효과를 얻을 수 있었다. Fig 12(b)에 나타낸 바와 같이 80K interceptor와 세라믹 윈도우 사이에 벨로우즈를 위치시킨 경우, 그림에 서 표시한 부분에서의 응력이 280MPa로 앞의 경 우에 비해 20MPa의 응력감소 효과를 얻을 수 있 었다. 안테나 케이스의 다른 부분(Fig. 12(b)에서 표시된 부분 외)에서는 300MPa로 앞의 경우와 동 일한 응력 값이 예측되었다.

위에서 설명한 바와 같이 80K interceptor 와 세라믹 윈도우 사이는 온도 구배가 가장 큰 부분으로서 열 변형이 가장 크게 일어나는 부분이기 때문에 가장 큰 응력이 발생하게 되고, 이때 발생하

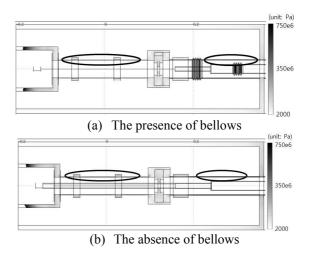
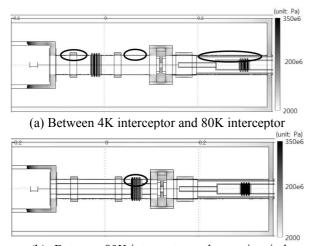


Fig. 11 Stress analysis results of the RF coupler model according to the presence or absence of bellows



(b) Between 80K interceptor and ceramic window

Fig. 12 Stress analysis results of the RF coupler model changing the position of bellows

는 응력을 벨로우즈를 통해서 줄여주어 최대의 응력 감소효과를 얻는 것으로 예측된다. 안테나에서 온도 분포는 내부에 77K의 냉각 가스가 일정하게 존재하므로 온도 구배가 적어 벨로우즈의 위치변경에 따른 응력변화가 미미하다. 세라믹 윈도우부분의 최대 응력은 세 경우 모두 150MPa로 예측되었다.

3.6 해석결과의 종합

벨로우즈를 적용시킨 모델의 경우는 벨로우즈 부분의 전계강도가 증가하나 RF 파의 전달 효율 에는 큰 영향을 미치지 않는 것으로 확인되었으며 안테나 내부의 각진 부분에 필렛을 추가해 주면 RF 파의 전달 효율이 20% 이상 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

전체적인 온도 분포는 서로 다른 모델에서 거의 동일한 분포를 보였으며 이는 RF 파의 출력에 의한 저항열의 값이 크지 않아서 온도 분포가 경계 조건에 지배적인 영향을 받기 때문으로 판단된다. 열손실 값은 모델에 따라 차이를 보이나 커플러 끝단의 최대값이 0.8W 미만으로 RF 커플러의 성능에 큰 영향을 미치지 않음을 확인할 수 있다. 열손실의 크기는 heat interceptor가 부착되어 있는 안테나 케이스의 두께 변화가 감소할수록 감소하나 이에 따른 파손의 위험이 증가함을 고려하여야한다.

응력은 구조물의 온도 구배에 따른 열변형에 의해 나타난다. 온도 구배는 모든 모델에서 유사하게 나타나기 때문에 열 변형의 양상 또한 유사하게 나타난다. 최대 응력은 안테나 케이스와 세라믹 윈도우 후방의 플렌지 부근에서 발생하며 이는

Table 2 Electric field strength at the tip and maximum stress in the RF coupler and the ceramic window according to the structural change

Model	Electric field	Maximum	Maximum
	strength at	stress in the	stress at the
	the antenna	whole system	ceramic
	tip (unit:	(unit: MPa)	window
	V/m)		(unit: MPa)
Prototype model	31397	850	170
Model with case			
thickness	30784	700	100
increase			
Model with	31796	700	100
bellows	31790	700	100
Model with			
bellows and	40655	700	100
fillet			
Model with			
different cooling	35833	350	150
module location			

그 위치에서 4K→80K→300K로의 급격한 온도 변화가 나타나기 때문이다. 열변형을 줄이기 위해서는 interceptor와 heater의 위치를 조정하거나, 케이스의 두께를 증가시키는 방안이 고려되어야 한다. 그리고 적절한 벨로우즈의 위치 선정(극저온유지모듈 내부에 설치, 온도 구배가 가장 큰 80K intercept 와 세라믹 윈도우 사이)을 통해 장치 내부에서 최대 응력의 감소 효과를 얻을 수 있었다. 세라믹 윈도우 에서 최대응력은 기준 모델의 경우최대값인 170MPa을 나타낸다. 이는 세라믹의 인장강도(282~551MPa)보다 작은 값으로 파손의 가능성은 낮은 것으로 판단다. Table 2는 각 모델에따른 해석 결과를 정리한 것이다.

4. 결 론

본 연구에서는 RF 커플러의 구조변화에 따른 FEA 해석을 수행하여 동일한 입력 파워에서 출력되는 전기장의 세기를 강화시킬 수 있는 구조와 열변형에 따른 응력을 줄일 수 있는 구조를 제시하였다.

- (1) 안테나 내부의 각진 부분에 fillet 을 추가함 으로써 안테나 내부의 전계 집중 현상을 막을 수 있고 출력 전기장의 세기가 커지는 것을 확인하였 다.
- (2) 극저온유지모듈의 위치변경을 통해 벨로우 즈를 극저온유지모듈 내부에 설치하거나 스테인리 스강 재질의 케이스의 두께를 늘려주면 장치 내부 에서 응력감소 효과를 얻을 수 있음을 확인하였다.

이에 따른 벨로우즈의 가장 적합한 위치로는 온도 구배가 가장 큰 80K interceptor와 세라믹 윈도우 사이로 판단된다. 또한 저항열의 발생은 상대적으로 미미하므로온도 구배에 의한 응력은 경계조건 변화에 지배적인 영향을 받음을 알 수 있다.

본 연구에서는 전자기-열 연성해석을 이용한 RF 커플러의 수치해석 방법을 확립하였으며 연구 의 결과는 향후 한국형 중이온 가속기 설계에 효 과적으로 이용될 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 2011 년도 정부의 재원에 의한 한국 연구재단의 지원(NRF-2011-0017512), 2012 년도 정 부의 재원에 의한 한국연구재단의 지원(NRF-2012M7A1A1057303) 및 국방과학연구소가 지원하 는 국방 피탐지 감소기술 특화연구센터 사업에 의 해 수행된 연구임.

참고문헌 (References)

- (1) Kako, E., Noguchi, S., Sato, M., Shishido, T., Watanabe, K., Yamamoto, Y., Jenhani H. and Zhao, T. X., 2009, "Advances and Performance of Input Coupler at KEK," *Proceedings of SRF 2009*, Vol. 9, pp. 486-490.
- (2) Veshcherevich, V., Bazarov, I., Belomestnykh, S., Liepe, M., Padamsee, H. and Shemelin, V., 2003, "Input Coupler for ERL Injector Cavities," Proceedings of 2003 Particle Accelerator Conference,

- Vol. 2, pp. 1201-1203
- (3) Alesini, D., 2010, "Power Coupling," *Proceedings of CAS'10: RF for Accelerators*
- (4) Przybyla, J., 2009, "COMSOL Multiphysics enhances design process at e2v technologies," *COMSOL Conference 2009*
- (5) Arkan, T., Ginsburg, C. M., Grassellino, A., Kazakov, S., Khabibouline, T., Nicol, T., Orlov, Y., Peterson, T., Ristori, L., Romanenko, A., Rowe, A., Solyak, N., Sukhanov, A. and Yakovlev, V., 2013, "SRF Development for a MW Proton Source at FERMI National Accelerator Laboratory," *Proceedings of IPAC2013*, pp. 2423~2425
- (6) Kazakov, S., Pronitchev, O, Cheban, S., Kramp, M., Poloubotko, V., Champion, M. S., Yakovlev, V. P., Khabiboulline, T. N., and Orlov, Y., 2012, "Main Coupler for Project X," *Proceedings of IPAC2012*, pp. 2324~2326
- (7) Hiatt, T., Breth, M., Drury, M., Getz, R., Phillips, L., Preble, J., Takacs, J., Schneider, W., Whitehead, H., Wiseman, M. and Wu, G., 2001, "Cryogenic testing of the RF Input Waveguide for the CEBAF Upgrade Cryomodule," *Proceedings of 2001 Particle Accelerator Conference*, Vol. 2, pp. 1155~1157
- (8) Humphries, S. Jr., 1997, Finite-element Methods for Electromagnerics, CRC Press, Boca Raton
- (9) Veshcherevich, V. and Belomestnykh, S., 2009, "Input Coupler for Main Linac of Cornell ERL," Proceedings of SRF 2009, pp. 544~545
- (10) Holzbauer, J., 2012, RF Theory and Design-Notes,U.S. Particle Accelerator School, Grand Rapids